



LA MONTAGNE: UNE VOIE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE?

Etienne Delay, Fabio Zottele, Hervé Quénol, G. Deros

► To cite this version:

Etienne Delay, Fabio Zottele, Hervé Quénol, G. Deros. LA MONTAGNE: UNE VOIE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE?. *Ciência e técnica vitivinícola*, 2013, 28 (1), pp.40-56. hal-00920102

HAL Id: hal-00920102

<https://hal.science/hal-00920102>

Submitted on 27 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA MONTAGNE : UNE VOIE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ? MOUNTAIN : A WAY FOR ADAPTATION TO GLOBAL WARMING?

Etienne DELAY^{1,*}, Fabio ZOTTELE², Hervé QUENOL³, Giorgio DEROS⁴

¹Laboratoire GEOLAB UMR 6042 CNRS, Université de Limoges, FLSH. 39E rue Camille Guérin 87036 Limoges

^{2 et 4}Sistema Informativo Geografico, Centre for Technology Transfer, Fondazione Edmund Mach, 38010 San Michele all'Adige, IT

³Laboratoire COSTEL, UMR6554 LETG Université Rennes 2, Place du Recteur Henri Le Moal, 35043 Rennes Cedex

.....
*Corresponding author :E.DELAY, Email :etienne.delay@etu.unilim.fr

RÉSUMÉ

La montagne est aujourd'hui vécue par les viticulteurs comme une contrainte structurale forte. Mais dans le contexte de changement climatique actuel où pour maintenir une production de qualité, nous nous tournons du côté de la génétique, de l'irrigation, ou de l'innovation des pratiques culturales, la montagne ne pourrait-elle pas s'imposer comme une solution d'adaptation au changement climatique dans la culture de la vigne ? Nous explorons ici les dynamiques territoriales qui peuvent se mettre en place au moyen de systèmes multi-agents.

ABSTRACT

The mountain is lived by vinegrowers as a strong structural constraint. In the current context of climate change, where we look at the side of genetics, irrigation, and innovation in cultural practices, could the mountain be a solution of adaptation to climate changes in vineyard activity? In this article we explore territorial dynamics that can be set up through agent based modeling.

Key words: Agent Based Modeling, landscape, global warming, spatial behavior

Mots-clés: Système Multi-agents, paysage, changement climatique, comportement spatial

1 Introduction

Dans le marché globalisé, la montagne est souvent vécue par les agriculteurs, et peut-être davantage par les viticulteurs comme un handicap naturel avec lequel il est nécessaire de composer. L'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) de Banyuls-Collioure, dans le département des " Pyrénées orientales ", peut être considérée comme l'un de ces espaces où l'Homme a été capable de former ces paysages si emblématiques à la manière des *utopies agrariennes postmodernes* (Briffaud and Davasse 2012) qui placent l'Homme, au cœur d'un combat contre la nature hostile contre une nature hostile. Ce paysage qui fait territoire, largement patrimonialisé (François, Hieczak, and Senil 2006), utilisé comme vecteur de marketing (Alcaraz 2001; Tempesta et al. 2010) est petit à petit délaissé.

Les 4 communes qui composent l'AOC du cru Banyuls – Collioure sont situées entre mer et montagne. L'altitude s'étend du niveau de la mer à 988m (sur les contreforts du " Massif des Alberts ") une pente variant de 0 et 180%. Son climat peut-être identifié comme méditerranéen (Carbonneau, Deloire, and Jaillard 2007) ou Csa selon la classification de Köppen (Peel et al. 2007). La structuration sociale donne une très large dominance au système coopératif et à une viticulture de petite taille¹. En 2011 la viticulture représentait encore 1600ha sur les 4 communes (soit 25% de la surface totale²), cultivés par environ 900 viticulteurs. Ce modèle d'une viticulture jardinée est depuis plusieurs années remise en question les successions ne se font plus, les coûts de production sont trop élevés, et petit à petit les zones hautes et les zones de pentes sont abandonnées. Parallèlement, les questions d'adaptation au changement climatique sont de plus en plus pressantes. Mais quand sont évoqué l'irrigation ou la génétique pour amortir les modifications sur le produit lié au changement climatique, peut-être que les zones de montagnes vont pouvoir transformer ce handicap structural en atout pour le futur en utilisant l'altitude pour conserver une maturité équilibrée de la vendange. Quel serait donc le devenir de ces territoires si demain la montagne n'était plus vécue comme une contrainte, mais comme un territoire refuge pour supporter le changement climatique ?

Nous allons explorer ce questionnement par l'intermédiaire de simulations informatiques distribuées en nous intéressant aux stratégies d'auto-organisation que le système va être capable de mettre en place. Nous avons donc créé un monde virtuel (isolé thermodynamiquement) construit à partir de données SIG et des valeurs économiques relatives au territoire. Nous nous inscrivons dans un individualisme méthodologique (Boudon 1991; Amblard 2010; Bommel 2010) qui s'intéresse aux comportements collectifs comme une forme complexe résultante de comportements individuels.

2 Matériels et méthodes

2.1 Acquisition et traitement des données

2.1.1 Température et acidité

La démarche scientifique issue de l'ANR TERVICLIM vise à instaurer une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques *in situ* et sur de la modélisation spatiale du climat, permettant d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir (valeurs climatiques moyennes et extrêmes). Confrontée à des observations agronomiques (ex : stress hydrique, phénologie, taux de sucre, taux d'alcool, ...), l'étude climatique permet de déterminer le climat spécifique d'un terroir. En comblant le manque de données aux échelles fines, ce travail permet d'affiner les connaissances sur les modifications climatiques qui pourront apparaître dans les terroirs viticoles et donc, d'améliorer les estimations sur les possibles impacts économiques. Cette méthodologie est développée et appliquée³ à plusieurs vignobles de renommée internationale, vignobles pour lesquels les caractéristiques climatiques jouent un rôle important sur la

1 La surface moyenne par exploitant étant de 1.5ha alors que la surface minimum pour l'installation (SMI) sur la zone est de 2.5ha

2 Sources cadastrales

3 Programmes ANR-TERVICLIM (2008-2012), GICC-TERADCLIM (2011-2013) puis ACCAF-LACCAVE (2012-2015).
<http://tervlim.in2p3.fr>

qualité du vin. La multiplication des sites expérimentaux (terroirs français, européens et étrangers du « nouveau monde ») permet d'étudier les potentialités agro-climatiques locales des terroirs dans des conditions macro-climatiques différentes.

L'AOC Banyuls-Collioure est entrée dans le réseau en 2011, avec l'installation d'un réseau de 11 capteurs de température (les points sur les cartes de l'illustration 1) sur des parcelles de grenache noir. Le mode de conduite est majoritairement (10/11 parcelles) le gobelet (pratique commune sur l'AOC). Nous disposons d'un enregistrement toutes les 10 minutes. Nous sommes donc en mesure de suivre et de spatialiser l'évolution de la température sur l'AOC. Pour les besoins de l'expérience, nous avons procédé à une moyenne de ces températures entre le 1^{er} mars 2012 (date d'installation des capteurs) et le 15 août 2012. Lors de la récolte de données thermiques, nous avons procédé à une analyse de maturité sur chacune des parcelles suivant la méthodologie⁴ de l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin) dans le but de collecter des données à corrélérer avec les enregistrements des températures. Ces valeurs sont rassemblées dans la table 1.

2.1.2 Traitement

Nous avons procédé à un test de corrélation de Pearson des données de température relevées avec les données altitudinales des capteurs. Le traitement et l'analyse statistique des données ont été faits avec le logiciel R (R Core Team 2012) et nous donnent une corrélation de -0,72 pour la période que nous évoquons dans le Erreur : source de la référence non trouvée. Ce résultat nous permet donc de supposer que l'altitude est un facteur déterminant dans la distribution spatiale des températures. Nous avons ensuite procédé à une régression linéaire pour disposer d'une carte des températures annuelles de l'AOC sur la période végétative de 2012. Nous avons effectué cette opération avec SAGA-GIS et son module de régression linéaire (Cimmetry and Conrad 2011) (figure de gauche de l'illustration 1).

$$f(t) = at + b$$

où t est la température, a l'altitude et b le terme d'erreur

Avec la même démarche, nous avons procédé à un test de Pearson pour tester la corrélation entre les températures sur la période de végétation et les valeurs d'acidité totale (en g*L⁻¹ de H₂SO₄) que nous avons relevées le 15 août 2012. Cette année-là, la corrélation de l'acidité avec la température était de 0.99. La spatialisation des résultats a été mise en œuvre grâce au module de régression linéaire de SAGA-GIS (visible sur la figure de droite de l'illustration 1).

2.2 Développement du modèle

Dans le cadre de ce travail, nous avons adapté et enrichi le modèle CAMOMile, développé en partenariat avec la fondation E.MACH (Trentino, IT) sur la plateforme Netlogo (Wilensky 1999). Nous avons effectué l'analyse de sensibilité du système sur le cluster de calculs du Limousin (CALI⁵), et traité les données issues du modèle avec le logiciel de statistique R (R Core Team 2012). La formalisation de description du modèle se conforme au protocole de description ODD (Overview, Design concept, Details) (Grimm et al. 2006; Grimm et al. 2010).

2.2.1 Objectif

Dans un contexte de changement climatique, nous explorons grâce à un modèle informatique distribué (CAMOMile-GIS), les possibilités d'adaptation au changement climatique offertes par l'orographie, ainsi que les conséquences de la prise en compte de l'élévation de la température sur la structuration et l'organisation des paysages. Nous nous plaçons ici du point de vue des viticulteurs, soumis ou non à des mesures incitatives de maintien d'une acidité constante de la vendange, et nous intéressons aux mécanismes responsables de l'émergence de structurations sociales et paysagères. En cela, les scénarii prospectifs de cette étude n'ont de valeur que pour comprendre l'influence sur les comportements spatiaux des dites mesures incitatives.

2.2.2 Entités, variables d'état et échelle de travail.

L'échelle temporelle : Chaque itération du modèle représente une année. Chaque tour nous ramenant à la situation d'acidité au 15 août. Cette échelle temporelle nous permet d'explorer les dynamiques spatiales qui sont liées aux dynamiques foncières. Nous effectuons 30 simulations de 600 itérations pour tester la stabilité et la sensibilité du modèle aux variations de paramétrisation.

L'échelle spatiale : nous situons ce travail sur l'AOC Banyuls – Collioures (Pyrénées orientales, France) sur une portion du territoire de 39 km² recouvrant une grande partie du bassin versant de la Baillauray sur la commune de Banyuls. La résolution de Netlogo est de 80x68 pour recouvrir parfaitement la projection de notre zone de travail.

L'organisation du modèle : l'approche multi-agents s'inscrit dans un individualisme méthodologique qui place le viticulteur comme agent décidant sur le territoire. Ses décisions de mise en culture, d'achat et de vente de parcelles vont se faire au niveau de chaque viticulteur en fonction de ses capacités de perception de son environnement (Ferber 1995). Ce qui va retenir toute notre attention seront les dynamiques spatiales et l'évolution des différents indicateurs du comportement de l'éco-socio-système (Goffin 1998) et ce dans le but de percevoir les modifications et les variations paysagères induites par le changement climatique et les comportement individuels des viticulteurs. Chaque viticulteur va cultiver ses parcelles, prendre la décision d'en abandonner certaines ou au contraire d'en planter de nouvelles en fonction de l'acidité moyenne de la vendange de toutes ses parcelles. En effet, dans le contexte de l'AOC Banyuls – Collioure où les superficies plantées sont faibles, chacun ajuste ses récoltes à l'échelle de ses possessions. Les viticulteurs sont dans un monde dynamique où les températures annuelles varient. Ils doivent donc s'adapter aux variations temporelles de leur espace. Dans notre cas, cette variation est une élévation de la température annuelle, ce qui va induire une diminution de l'acidité des baies lors de la maturation des raisins. Si l'agent décidant est bien le viticulteur, nous ne nous intéressons ici qu'aux dynamiques générales de la viticulture dans le système, et non aux dynamiques individuelles.

Les variables d'état des entités : Dans CAMOMile-GIS, le climat existe par l'intermédiaire des *patches*, qui représentent la résolution spatiale des actions du système. Chaque parcelle (*patches*) se caractérise donc par sa température, son acidité, son altitude, sa pente, son propriétaire, l'âge de l'implantation viticole (qui pour le cas de Banyuls va permettre de régler le temps d'implantation de la vigne, mais pas les replantations dans la mesure où les ceps sont remplacés au fur et à mesure). Les viticulteurs, quant à eux, sont caractérisés par leur capital propre, l'acidité moyenne de leur *patches*, le nombre d'employés dont ils ont besoin pour entretenir leur exploitation et enfin un *agent-set*

4 Description de la méthodologie d'analyse de la maturité <http://www.vignevin-sudouest.com/services-professionnels/methode-analyse/Prelevement-de-raisins.php> consulté le 22 février 2012

5 Présentation du cluster de calcul CALI http://www.unilim.fr/sci/wiki/cali/la_machine consulté le 15 février

contient toutes les parcelles du viticulteur.

2.2.3 Processus et ordonnancement

Le modèle CAMOMiLe-GIS est construit pour explorer les comportements d'un territoire viticole (ici l'AOC Banyuls – Collioure) face au changement climatique. Il met donc en scène, les mécanismes inter-actionnels entre le territoire (support physique de production viticole) et l'Homme qui va non seulement adapter un certain nombre de ses pratiques, mais également être influencé par les variations de son environnement. CAMOMiLe-GIS est divisé en 9 sous-modèles (détaillés dans la partie 2.2.8) qui se succèdent de la manière suivante :

- pour les parcelles
 - mise à jour de la température
 - mise à jour de l'acidité
 - mise à jour des bonus et malus en fonction de l'évolution du climat
 - mise à jour de l'âge de la vigne
- pour les viticulteurs
 - mise à jour de la main d'œuvre nécessaire pour l'année
 - mise à jour de l'acidité moyenne des *patches*
 - mise en vente d'une parcelle
 - achat d'une parcelle

2.2.4 Concepts d'élaboration

Principe de base : observation des mécanismes de structuration de l'éco-socio-système et des phénomènes d'auto-adaptation et d'auto-organisation des agents viticulteurs mis en jeu dans un contexte de changement climatique. En particulier ici, nous observerons l'utilisation des espaces plus élevés pour échapper aux processus de maturation inéquilibrée dus aux fortes chaleurs et fortes radiations de la zone de l'AOC. Le modèle nous permettra d'explorer différents scénarii d'évolution de la température et ainsi explorer et anticiper ces phénomènes.

Émergence : par l'intermédiaire de CAMOMiLe-GIS, nous explorerons les réponses du territoire au changement climatique. Ils mettent en lumière ici les successions de périodes de rupture et ainsi permettent d'évaluer la part de virtualisation et inhibitions (Morin 1981) des forces humaines et environnementales sur le territoire qui conduisent aux phases d'extension et régression du vignoble.

Objectif : Chaque viticulteur va tenter de pérenniser son activité et d'optimiser ses réponses au système en fonction de l'évolution de son environnement.

Observations : Les données sont analysées pour chaque simulation (1320 simulations) et pour les 600 itérations temporelles du modèle. Parmi les résultats, nous nous intéressons à l'évolution de la pente et de l'altitude moyenne des parcelles mises en culture, au nombre de parcelles dont l'acidité est supérieure à 3, au nombre de parcelles viticoles totales, à l'évolution de la température et à l'évolution de l'acidité. Notre intérêt se portera aussi sur le capital moyen du territoire ainsi que sur les coûts de production et les gains moyens.

2.2.5 Initialisation

Lors de l'initialisation de chaque simulation, les données SIG issues du modèle numérique de terrain, d'un modèle de pente, du modèle d'acidités et de température sont chargées dans les *patches* en tant que variables locales. La ville de Banyuls est positionnée sur la carte et nous générerons de manière aléatoire une population initiale de viticulteurs. Chaque viticulteur se voit doté de 10 parcelles prêtes à produire (d'un âge > 5) dans un rayon de 5 *patches*.

2.2.6 Variables d'initialisation

La plupart des valeurs fixes sont des valeurs ayant trait à l'économie de l'AOC. Elles sont synthétisées dans la table II

2.2.7 Variables de forçage

Il n'y a pas d'entrée externe au système une fois la simulation commencée.

2.2.8 sous modèles

Nous avons distingué deux types de sous-modèle ; ceux exécutés par les parcelles, et ceux exécutés par les viticulteurs.

Pour les parcelles :

Mise à jour de la température → elle évolue de manière linéaire (illustration 2) à chaque itération. Le coefficient directeur de la courbe peut être ajusté par l'utilisateur. Dans nos analyses de sensibilité, nous avons exploré le système avec 0.01, 0.02, 0.05 et 0.1 (??) par an. Celui-ci est initialisé avec les valeurs calculées par régression linéaire déjà évoquée en 2.1.2.

Mise à jour de l'acidité → elle évolue elle aussi linéairement, mais de manière négative par rapport aux températures. Dans le modèle, elle est définie comme : $Acidité_t = Acidité_{(t-1)} - Evt * 0.7$

avec *Evt* le coefficient directeur de la droite de température, lequel est multiplié par 0.7.

La correction du coefficient de température sur les données que nous avons recueillies devrait être de 0.9, mais vu le peu d'épaisseur de nos données, il est plus opportun d'utiliser les valeurs d'une étude menée entre 1996 et 2006 sur Saint-Émilion (Van Leeuwen et al. 2004). Le modèle pouvant bien évidemment être revisité lorsque nous disposerons sur la zone de plus de valeurs pour identifier l'influence du climat sur l'acidité. Comme pour la température, les valeurs initiales de l'acidité sont issues du calcul par régression linéaire évoquée en 2.1.2

Mise à jour des bonus et malus en fonction de l'évolution du climat → le calcul des gains du viticulteur se fera sur chaque parcelle. Un bonus/malus lui est attribué si la parcelle répond ou non aux besoins d'acidité de la coopérative. Dans ces simulations, l'acidité générale de la coopérative ne doit pas descendre sous une acidité totale (en g*L⁻¹ de H₂SO₄) de 3. Ainsi les gains à la parcelle sont bonifiés si l'acidité de la vendange est supérieur à 3 et minorés si l'acidité est inférieur à 3. La valeur de ce bonus-malus a été testée de 0 à 1000 par incrémentation de 100.

Mise à jour de l'âge de la vigne → l'âge de la vigne est incrémentée à chaque itération, et elle n'entre en production qu'au bout de 3 ans.

Pour les viticulteurs :

Mise à jour de la main d'œuvre nécessaire pour l'année → la prise en compte de la main d'oeuvre nous est apparue importante, car elle permet de comprendre l'impact local de la viticulture. Nous avons défini le besoin de main d'œuvre comme :

$$\text{Capacité de travail} = \frac{1}{(\text{pente}/100)}$$

La capacité de travail (illustration 3) est exprimée en unité surfacique et permet d'évaluer la surface qu'un Homme est capable de cultiver par an. Nous utilisons cette fonction pour calculer le besoin de chaque viticulteur en main d'œuvre en fonction de la pente moyenne de son exploitation.

$$\text{Main d'oeuvre} = \frac{\text{nbpatches}}{\text{capacité de travail}}$$

Le coût de la main d'œuvre entre en compte dans le calcul des coûts de production annuels du viticulteur.

Mise à jour de l'acidité moyenne des patches → à chaque itération le viticulteur va tenir une comptabilité de l'acidité moyenne effective sur son exploitation. Cette valeur sera l'un des critères de choix lors de l'achat/vente de parcelles.

Vendre une parcelle → si le capital du viticulteur n'est pas suffisant pour assumer les coûts de production de l'année suivante (coût de production matériel fixe par parcelle et coût de la main d'œuvre) il va vendre une parcelle. Il sera en mesure de répéter l'opération 5 fois de suite, si la condition n'est pas respectée. Au-delà, il effectuera une nouvelle itération.

Acheter une parcelle → L'une des conditions pour l'achat d'une nouvelle parcelle est l'analyse de l'acidité moyenne de les parcelles du viticulteur. Si son acidité moyenne est supérieure à 3, il ne tiendra pas compte de l'acidité de la nouvelle parcelle lors de son achat, dans le cas contraire il ajoutera dans ses critères de recherche des parcelles dont l'acidité est supérieure à 3. Une fois passé cette première condition, le viticulteur décide d'acquérir une nouvelle parcelle quand son capital est supérieur aux coûts de production annuels et qu'il peut assumer les coûts supplémentaires de production d'une nouvelle parcelle sur les 5 années qui suivent. Les parcelles ne peuvent être achetées que dans un rayon de 8 *patches* autour des parcelles déjà cultivées par ce viticulteur. Enfin, celui-ci préférera la parcelle aux coûts de production les moins élevés.

2.3 Simulations

Nous avons effectué une analyse de stabilité du système viticole en faisant uniquement varier le bonus-malus de 0 à 2000 par incrémentation de 100. Pour chaque paramétrisation, nous avons effectué 40 simulations de 600 itérations, nous amenant à traiter les données issues de 840 simulations. Nous avons observé plus particulièrement : l'altitude moyenne des *patches*, leur pente moyenne, leur acidité moyenne en faisant la distinction entre les *patches* cultivés et ceux non cultivés. Nous avons également observé le nombre de *patches* viticoles, l'évolution de la température et de l'acidité moyenne du système. L'ensemble des données a été traité avec le logiciel R (R Core Team 2012).

3 Résultats et discussion

Nous voulons ici évaluer les conséquences du couple bonus-malus dans l'inflexion des comportements " naturels " des viticulteurs. Nous assumons la faible probabilité que le système, tel que nous l'avons construit, reflète une réalité à cette échelle temporelle. Néanmoins, il nous est apparu intéressant de conserver l'ensemble de ce jeu de données pour mettre en évidence un phénomène émergent d'auto-organisation des viticulteurs, phénomène sur lequel nous reviendrons en 3.2.3. Nous avons choisi de focaliser nos résultats sur les valeurs de bonus 0, 500, 1000, 1500 qui représentent respectivement 0%, 8.5%, 17%, et 25% des revenus par parcelles.

3.1 Résultats

3.1.1 Évolution naturelle du système :

La figure en haut à gauche de l'illustration 4 permet de suivre l'évolution de la colonisation spatiale de la viticulture sur la zone en fonction du temps, et cela au travers de 40 simulations. Dans ce scénario, les viticulteurs sont laissés libres de choisir les parcelles qui leur conviennent le mieux (choix essentiellement basé sur les coûts de production au regard des gains). On constate que la moyenne des valeurs suit une pente croissante régulière jusqu'à 230-240 ans. S'ensuit une phase de " plateau " d'une centaine d'années puis une lente décroissance du nombre de parcelles viticoles.

On observe une zone " d'étranglement " dans le résultat des simulations avec des écarts types plus resserrés à 300 itérations. Ceux-ci ont également tendance à se resserrer en fin de simulation. Les valeurs simulées s'approchent ici d'optimums qui sont moins déterminés par la distribution aléatoire des viticulteurs que par les conditions environnementales auxquelles doit faire face chaque viticulteur.

3.1.2 Conséquence du bonus sur la couverture du sol et le paysage

Si l'on considère l'illustration 4 dans sa globalité on constate que la mise en place d'un bonus/malus (équivalent) en fonction de l'acidité permet d'orienter la structuration du territoire. En effet, si le bonus profite aux parcelles qui sont situées au-dessus de la limite d'acidité fixée par la coopérative, il est une contrainte de plus pour les parcelles situées en dessous qui voient les gains diminuer du fait d'un malus. Cette orientation territoriale va donc favoriser les parcelles les plus proches du village, les parcelles les plus " plates " mais ayant une acidité la plus haute possible. Au vu des stratégies des viticulteurs, cette stratégie va profiter à une zone de proximité autour du village puis à la " montagne ".

Sur l'illustration 5, nous constatons que le bonus permet de maintenir la viticulture dans les zones d'altitude en conservant, à un niveau plus

élevé, la moyenne des altitudes sur les parcelles quand le bonus s'applique au regard des simulations effectuées sans bonus. On observe toujours pour l'altitude que le bonus favorise un étalement d'altitude avec des quartiles bien plus éloignés de la moyenne dans les situations avec bonus. Les viticulteurs tentent de conserver une acidité moyenne stable en jouant avec les altitudes. La pente (les 4 figures inférieures de l'illustration 5) est elle aussi favorisée par la politique de bonification. En effet, le bonus permettant d'ouvrir à la culture des parcelles avec des coûts de production plus élevés, engendre le même type de comportement que pour l'altitude, une plus grande hétérogénéité de ce critère lors du choix des parcelles.

3.1.3 Les conséquences du bonus sur l'acidité

Dans nos scénarii, les viticulteurs sont encouragés à maintenir une acidité moyenne à l'échelle de leur capital foncier à une valeur de 3 lors de la période de la vendange. On constate sur les courbes de l'illustration 6 que le bonus a pour effet de réduire la dispersion des valeurs d'acidité des parcelles sur le moyen et long terme (4 figures supérieures). Sur le court terme, le bonus permet de relever et maintenir l'acidité générale (figures inférieures de l'illustration 6). On notera que le bonus de 500 (8.5% des revenus de la parcelle), s'il a un effet sur le maintien d'une acidité moyenne, ne permet pas de stabiliser le système avec une acidité supérieure à 3.

3.1.4 Structuration du paysage en fonction du bonus

Pour percevoir plus précisément les changements de comportement induits par la variation du bonus, nous nous intéressons ici à 4 simulations. L'illustration 7 nous permet de comparer les évolutions du système dans chacun des cas de bonus étudiés précédemment. Les données géographiques qui servent ici à la représentation spatiale représentent l'évolution de l'acidité à travers la simulation (dégradé de vert pour les valeurs d'acidité les plus hautes au noir pour les valeurs les plus basses). On observe bien une baisse générale de l'acidité du territoire, année après année (zone noire de plus en plus importante).

Notre simulation témoin (la première ligne de l'illustration 7 avec un bonus de 0) permet de voir comment le paysage se structure dans un monde sans contrainte (autre qu'orographique). Les zones de fond de vallée sont les premières à être implantées, puis la colonisation gagne petit à petit les abords du village mais continue à suivre les fonds de vallée.

Dès l'instant où un bonus/malus est instauré, les comportements changent radicalement. Dans le cas d'un bonus à 500, les zones hautes, avec une priorité sur les interfluvies proches du village, sont plus volontiers mises en culture. La viticulture se structure à proximité du village avec une préférence pour le nord de la zone. Mais les zones de fond de vallée à proximité immédiate du village ne sont pas abandonnées.

Dans le cas des simulations avec un bonus/malus supérieur ou égal à 1000, la phase d'extension du vignoble est plus rapide avec des implantations dans les zones du sud et du sud-ouest. Toutefois la rétraction est extrêmement importante et petit à petit, après 400 itérations, persiste un îlot viticole au sud et les vignes à proximité du village.

3.2 Discussions

Pour l'ensemble des simulations, nous nous sommes placés dans un monde connecté à un marché sans limite, capable d'absorber la production, quelles qu'en soient les caractéristiques. La coopérative présente dans le système n'a donc pas besoin de mettre en place des mesures de gestion des stocks et des prix en fonction des récoltes et de ses marchés. La mise en place d'un bonus par la coopérative est donc LA contrainte sociale à laquelle la population de viticulteurs doit faire face.

3.2.1 Évolution naturelle du système

Dans le cas d'une évolution naturelle et sans contrainte du système (sans bonus), nous assistons à une croissance régulière de la couverture du sol par la vigne (illustration 4) avec une préférence pour les zones plates (illustration 5), à proximité du lieu d'habitation et de la coopérative. Nous aboutissons donc à un système où la population de parcelles viticoles atteint un maximum plus élevé et ne subit pas une rétraction aussi intense que dans les cas suivants. Nous sommes donc dans un système où les viticulteurs comme les consommateurs ne tiennent pas compte du changement climatique. La demande est infinie et l'offre est limitée par les conditions orographiques difficiles de la zone. Dans ce cas, la coopérative devra composer avec des dates de vendange étalées dans le temps (qu'on peut observer grâce à l'hétérogénéité des acidités sur la 1^{re} figure de l'illustration 6). L'acidité a tendance à monter en début de simulation (et ce, quel que soit le bonus) à cause de la proximité des zones de "montagne", mais elle est ensuite rattrapée par l'élévation globale de la température du système, entraînant, de fait, la diminution inéluctable de la couverture viticole observable dans toutes les simulations. D'un point de vue paysager, la viticulture reste concentrée dans les zones proches de la coopérative, et profite ça et là des vallées pour s'enfoncer dans le territoire. Comme le réchauffement n'a pas d'impact sur le comportement des agents, le recul de la viticulture est liée ici exclusivement à des rééquilibres individuels en fonction de l'évolution du capital dont dispose chaque viticulteur pour faire face à ses coûts de production (campagne de culture, coûts de la main d'œuvre).

3.2.2 Les effets du bonus-malus

Dès l'instant où le territoire est soumis à cette contrainte socio-environnementale (nécessité d'une acidité proche de 3) le comportement du système est impacté. L'effet du bonus va permettre de rendre attractives des portions de territoire qui ne l'étaient pas à cause de leur distance ou de leur pente, mais qui au vu des besoins en acidité du viticulteur à l'instant T deviennent un objet de convoitise. On observe donc une progression plus rapide du nombre de patches implantés en vigne pendant la phase d'extension du vignoble (illustration 4). La surface maximum occupée par la vigne est toujours plus faible que dans notre situation de test, et la décroissance du vignoble est, elle aussi, accentuée par la valeur du bonus.

On observe également que cette balance bonus/malus permet de stimuler l'extension viticole sur les coteaux et les hauteurs (illustration 5) en faisant gagner presque 2 points à la pente moyenne et 17 points à l'altitude moyenne du système dix ans après le début de la simulation, ce qui a bien évidemment des conséquences directes sur l'acidité moyenne des parcelles viticoles (illustration 6). Sur ce point, on note que l'acidité est maintenue relativement stable les premières années (ce que l'on peut constater sur les figures inférieures de l'illustration 6) mais qui entraîne le système vers des comportements inquiétants à très long terme avec un effondrement des superficies cultivées (illustration 7), avec notamment une concentration à proximité immédiate des zones d'habitation. L'acidité négative n'ayant pas de sens, nous pouvons l'interpréter comme un déplacement conséquent de la fenêtre de vendange au cours de l'année. En effet, notre modèle étant paramétré avec un pas temporel annuel nous ne sommes pas en mesure d'observer les comportements à une échelle temporelle infra-annuelle.

3.2.3 Une réorganisation à long terme

Le comportement à long terme du système n'a pas ou peu d'intérêt d'un point de vue opérationnel (des réglés décisionnels fixe sur une aussi longue période sont peu probables), mais permet d'observer un comportement fonctionnel d'auto-adaptation et d'auto-organisation du système particulièrement intéressant. En effet, un comportement émergent de premier ordre s'observe (Gilbert 1995; Gilbert and Troitzsch 2005) lorsque la coopérative intègre le système de bonus/malus, ce qui entraîne une extension du vignoble. Ce bonus-malus est directement assimilé par le viticulteur dans les gains et les coûts de production liés à ces parcelles. Les surfaces éligibles au bonus diminuant chaque année, les viticulteurs doivent s'installer de plus en plus loin et de plus en plus haut pour s'assurer du bonus sur l'acidité. Or cette structuration n'est pas soutenable au point que le système se réorganise, car les viticulteurs, un à un, arrêtent finalement cette quête de l'acidité. Ainsi abandonnent-ils leurs parcelles les plus éloignées pour ne conserver que les parcelles proches du village/coopérative. Le système trouve alors un nouvel " équilibre ". Les coûts de production au voisinage du village étant moins élevés, les viticulteurs peuvent supporter financièrement le malus engendré par la mauvaise maturation.

4 Conclusion

La montagne est incontestablement une voie d'adaptation au changement climatique. Elle va permettre aux viticulteurs de conserver leur pratiques sociales et culturelles, leurs cépages et donc de limiter les impacts négatifs du changement climatique sur la production. Elle peut être utilisée pour étaler les périodes de vendange, palier au manque d'eau de la période estivale, profiter de plus grandes amplitudes thermiques en période de maturation (Tonietto and Carbonneau 2004), aussi bien que pour valoriser la production par la construction d'une image positive du vignoble (Tempesta et al. 2010). Toutefois dans la configuration actuelle du système, les agents (viticulteurs) ne sont pas disposés à l'emprunter d'eux-même. Tant que leur vendange est achetée, ils n'ont pas besoin de réorienter leur production. Les coopératives présentes sur le territoire jouent un rôle majeur dans la structuration du tissu agricole sur le territoire, et ce sont elles qui vont orienter le territoire vers une voie d'adaptation. Elles représentent pour le viticulteur la partie visible du marché viticole et permettent du point de vue du modélisateur de simplifier les mécanismes liés directement au comportement du marché. Le même travail pourrait être fait sur des populations de viticulteurs vigneron, mais, dans ce cas là, les demandes du marché ne pourront plus être ignorées et il faudrait alors tenir compte d'un nombre encore plus grand de virtualisation et d'inhibition des forces (Morin 1981) en place dans la réalité.

5 Remerciements

Merci à Etienne Neethling (INRA d'Angers) dont les conseils précieux ont permis d'entrevoir la complexité de la physiologie de la plante. Merci à Cyril Piou (CIRAD de Montpellier) pour ses explications de l'ODD.

6 Références bibliographiques

- Alcaraz, F. 2001. "L'utilisation Publicitaire Des Paysages De Terrasses." *Etudes Rurales* (1): 195–209.
- Amblard, F. 2010. "Construire Des Sociétés Artificielles Pour Comprendre Les Phénomènes Sociaux Réels." *Nouvelles Perspectives En Sciences Sociales: Revue Internationale De Systémique Complexe Et D'études Relationnelles* 5 (2). simsoc.free.fr/ressources/articles/2010/NPSS.pdf.
- Bommel, P. 2010. "Définition D'un Cadre Méthodologique Pour La Conception De Modèles Multi-agents Adaptée à La Gestion Des Ressources Renouvelables". Montpellier II - Sciences et technique du Languedoc. http://tel.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=0geahsctmgeaktu5p870pqaro1&view_this_doc=tel-00396803&version=3.
- Boudon, Raymond. 1991. "Chapitre 2. Individualisme Et Holisme Dans Les Sciences Sociales." *Références*: 45–59.
- Briffaud, Serge, and Bernard Davasse. 2012. "Du bon usage du passé des paysages. Récits paysagers et durabilité dans trois sites viticoles européens du patrimoine mondial (Tokaj, Saint-Émilion, Cinque Terre)." In *Paysage et développement durable*, edited by Terrasson D. Luginbühl Y., 171–183. Éditions Quæ. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00787453>.
- Carbonneau, Alain, Alain Deloire, and Benoît Jaillard. 2007. *Viticulture : La Vigne : Physiologie, Terroir, Culture*. Dunod.
- Cimmery, V, and O Conrad. 2011. *Regression Analysis (Grids/Points)*. SAGA-GIS. http://sourceforge.net/apps/trac/saga-gis/wiki/geostatistics_regression_0.
- Ferber, Jacques. 1995. *Les Systèmes Multi-agents : Vers Une Intelligence Collective*. InterEditions.
- François, H, M Hieczak, and N Senil. 2006. "Territoire Et Patrimoine : La Co-construction D'une Dynamique Et De Ses Ressources." *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* décembre (5): 683. doi:10.3917/reru.065.0683.
- Gilbert, N. 1995. "Emergence in Social Simulation." *Autonomous Societies: The Computer Simulation of Social Life*: 144–156.
- Gilbert, N., and K. G. Troitzsch. 2005. *Simulation For The Social Scientist*. 2nd Revised edition. Open University Press.
- Goffin, L. 1998. "L'environnement Comme Éco-socio-système." *Populations Et Développements: Une Approche Globale Et Systémique. Louvain-La-Neuve Et Paris. Academia Bruylant Et L 'Harmattan*. P199-230.
- Grimm, V, Uta Berger, Finn Bastiansen, Sigrunn Eliassen, Vincent Ginot, Jarl Giske, John Goss-Custard, et al. 2006. "A Standard Protocol for Describing Individual-based and Agent-based Models." *Ecological Modelling* 198 (1–2): 115 – 126. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023.
- Grimm, V., U. Berger, D.L. DeAngelis, J.G. Polhill, J. Giske, and S.F. Railsback. 2010. "The ODD Protocol: A Review and First Update." *Ecological Modelling* 221 (23): 2760–2768.
- Van Leeuwen, Cornelis, Philippe Friant, Xavier Chone, Olivier Tregoeat, Stephanos Koundouras, and Denis Dubourdieu. 2004. "Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir." *American Journal of Enology and Viticulture* 55 (3): 207–217.
- Morin, Edgar. 1981. *La Méthode, Tome 1*. Seuil.
- Peel, M.C., B.L. Finlayson, T.A. McMahon, and others. 2007. "Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification."

Hydrology and Earth System Sciences Discussions 4 (2): 439–473.

R Core Team. 2012. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.

Tempesta, Tiziano, Rosa Arboretti Giancristofaro, Livio Corain, Luigi Salmaso, Diego Tomasi, and Vasco Boatto. 2010. “The Importance of Landscape in Wine Quality Perception: An Integrated Approach Using Choice-based Conjoint Analysis and Combination-based Permutation Tests.” *Food Quality and Preference* 21 (7): 827 – 836. doi:10.1016/j.foodqual.2010.04.007.

Tonietto, J., and A. Carbonneau. 2004. “A Multicriteria Climatic Classification System for Grape-growing Regions Worldwide.” *Agricultural and Forest Meteorology* 124 (1-2): 81–97. doi:doi: DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.06.001.

Wilensky, U. 1999. *Netlogo*. Netlogo (version 5.0.4). Northwestern University. Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

Table I : Récapitulatif des données collectées par les 11 capteurs du Cru pour la période de mars à août

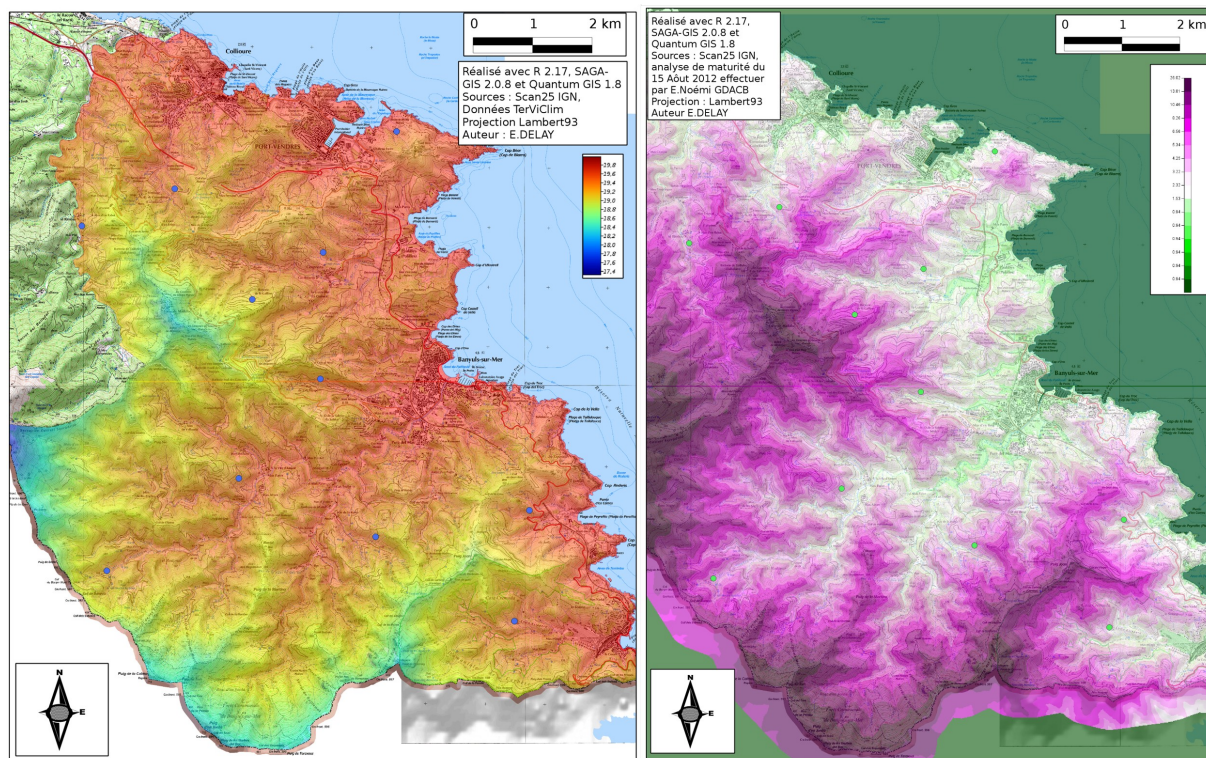
Table I : Summary of data collected by 11 weather sensors for the period from march to august

Station	Cap Béart	Le Rimbeau	Col de mollo	Cospron	Peyrefite	Casa cermada	La galline	Vigne- expe	Ille	Coubaret mas cornet	Les escoumes
Elévation	159	127	54	87	116	110	259	114	139	192	157
Température mars-Août 2012	19.139	18.829	19.312	19.621	19.638	19.668	18.462	19.563	19.550	19.102	19.293
Degré	14.10	13.70	14.60	13.20	14.60	12.60	9.70	NA	15.40	15;40	15.60
Acidité (15 Août)	4.6	5	4.2	3.8	3.9	4.3	9.3	NA	4.3	4.6	3.8

Table II : Variables de forçage

Table II : Input variables

Description des variables	Valeur
Capital initial : est le capital qui permet au viticulteur d'effectuer ses premières campagnes de culture	6000
Le revenu par parcelle : il est fixe, quelle que soit la parcelle. Fixé pour la modélisation entre 5850 et 7800 suivant le type de vin fléché sur la parcelle (Banyuls ou Collioure).	5900
Le prix d'achat d'une parcelle jamais exploitée prend en compte tous les aménagements. Il est fixé ici pour toutes les parcelles	33000
Le prix d'achat d'une parcelle déjà exploitée est fixe, quelle que soit la parcelle	17000
Le prix de vente d'une parcelle par le viticulteur en cas de difficultés financières	17000



*Illustration 1: Résultat des regressions linéaires : à gauche, une carte des températures moyennes sur l'AOC Banyuls - Collioure durant la période végétative de 2012 (les points représentent la position des capteurs), à droite, une carte de l'acidité totale (en g*L⁻¹ de H₂SO₄) estimée par régression linéaire sur la base des relevés du 15 août 2012.*

*Illustration 1 : Results of linear regressions: on the left, a map of average temperatures on the AOC Banyuls - Collioure during the 2012 growing season (dots represent position of weather sensors). On the Right, a map of the total acidity (in g * L⁻¹ H₂SO₄) estimated by linear regressions on the base of August 15th, 2012 statements.*

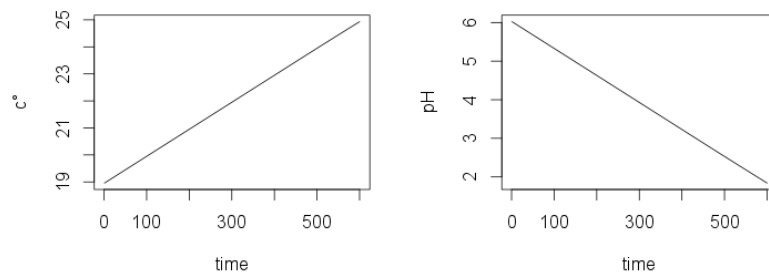


Illustration 2: Exemple d'évolution de la température moyenne sur la période végétative (à gauche) et de l'acidité totale (en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2SO_4) moyenne au 15 Août à l'échelle de l'AOC avec une valeur de Evt de 0,01 (à droite).

Illustration 2: Example of the evolution of average temperature during the vegetative period (left table), and average of total acidity (en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2SO_4) on August 15th across the AOC, with a Evt value at 0.01 (right table).

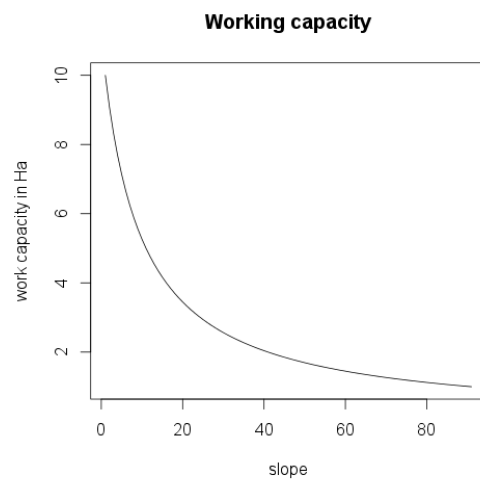


Illustration 3: Courbe de la "capacité de travail" dans la simulation pour un homme en fonction de la pente de la parcelle.

Illustration 3: Curve of "working capacity" in the simulation for a man depending on the slope of the plot

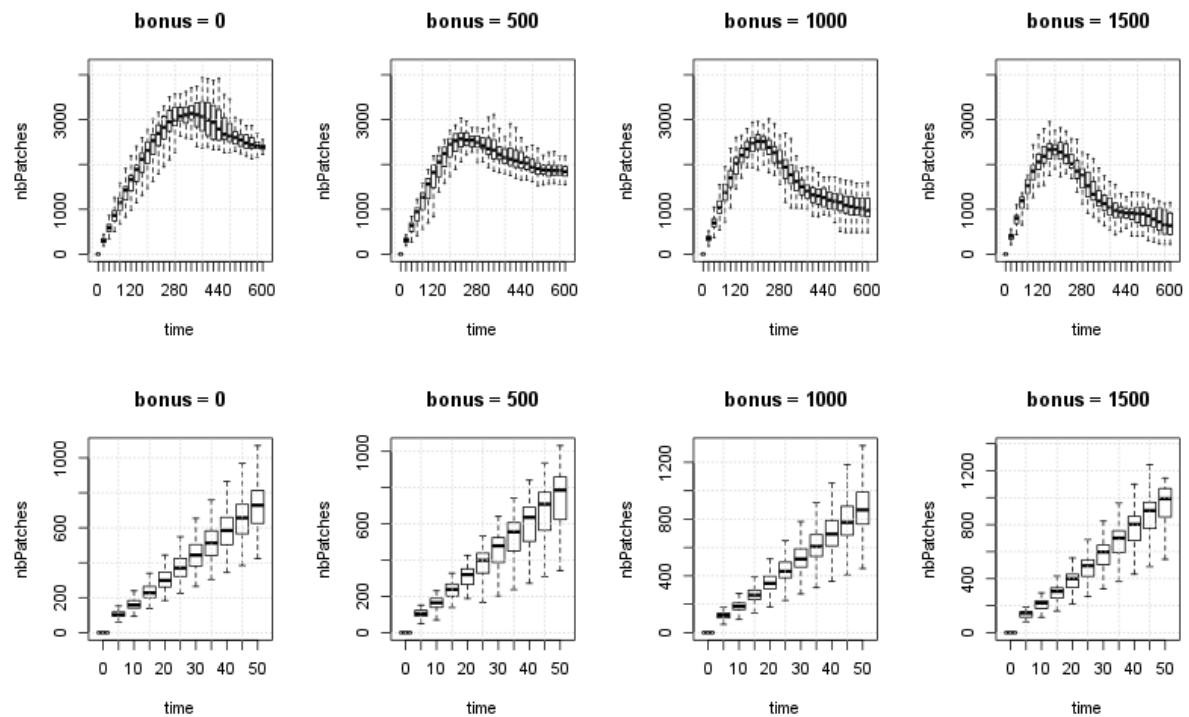


Illustration 4: Évolution de la couverture viticole en fonction du bonus lié à l'acidité (les 4 figures supérieures représentent cette évolution sur l'intégralité de la simulation, tandis que les figures inférieures se concentrent sur les 50 premières années de la simulation).

Illustration 4: Evolution of the wine cover with bonus related to acidity (the 4 figures above represent the evolution during the entire simulation, while the figures below focus on the first 50 years of the simulation).

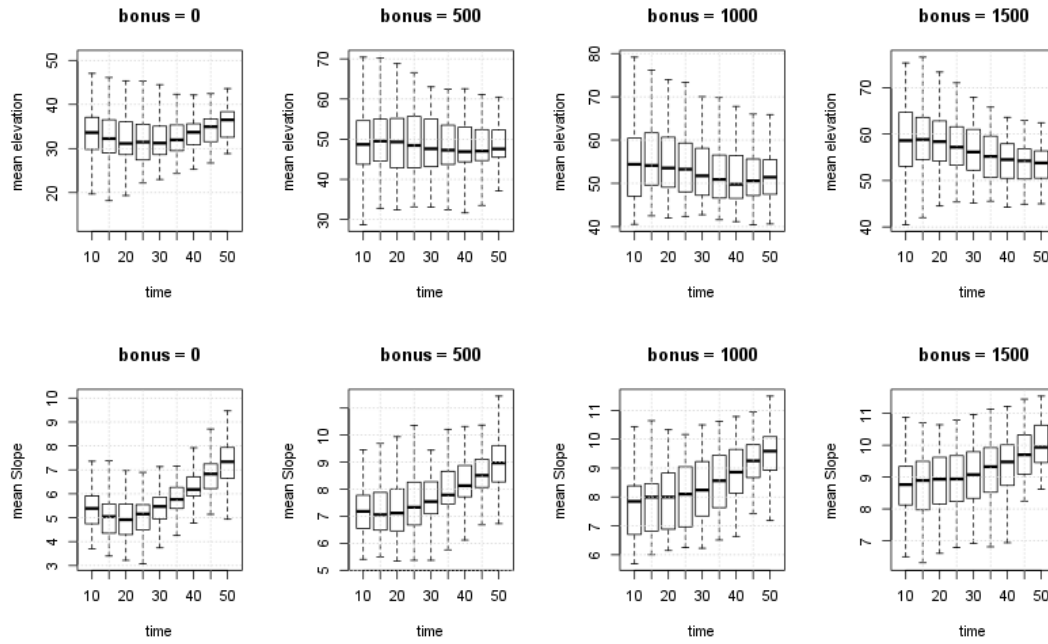


Illustration 5: Évolution de l'altitude moyenne des parcelles (série supérieure) et de la pente moyenne des mêmes parcelles sur 50 ans (série inférieure).

Illustration 5: Evolution of the average elevation of the plots (top series) and the average slope of the same plots over 50 years (bottom series)

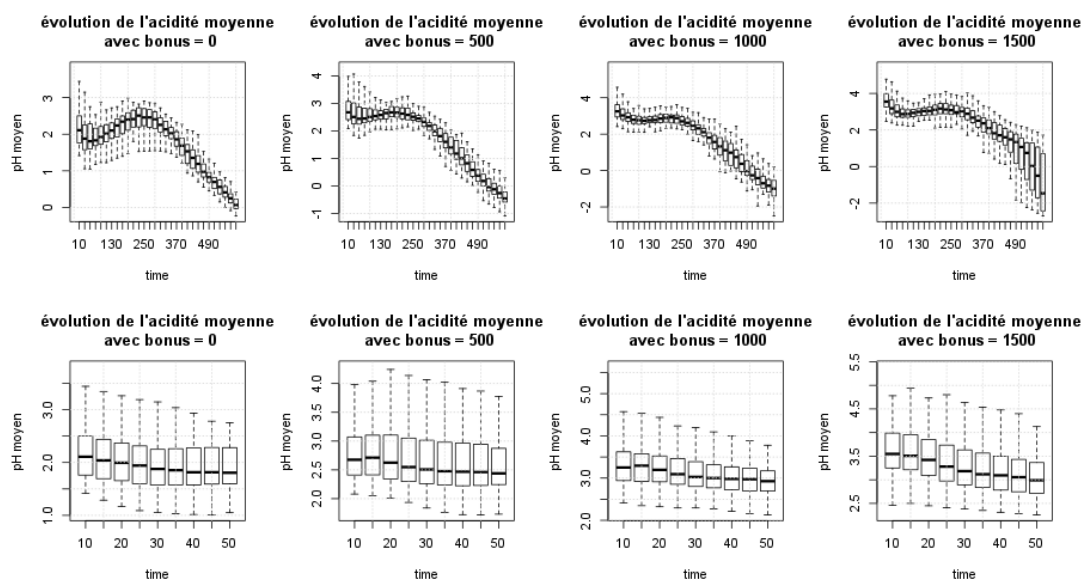


Illustration 6: Évolution de l'acidité mesurable au 15 août à travers 600 itérations et 4 bonus différents

Illustration 6: Evolution of acidity measurable in August 15th, through 600 iterations and with 4 different bonus

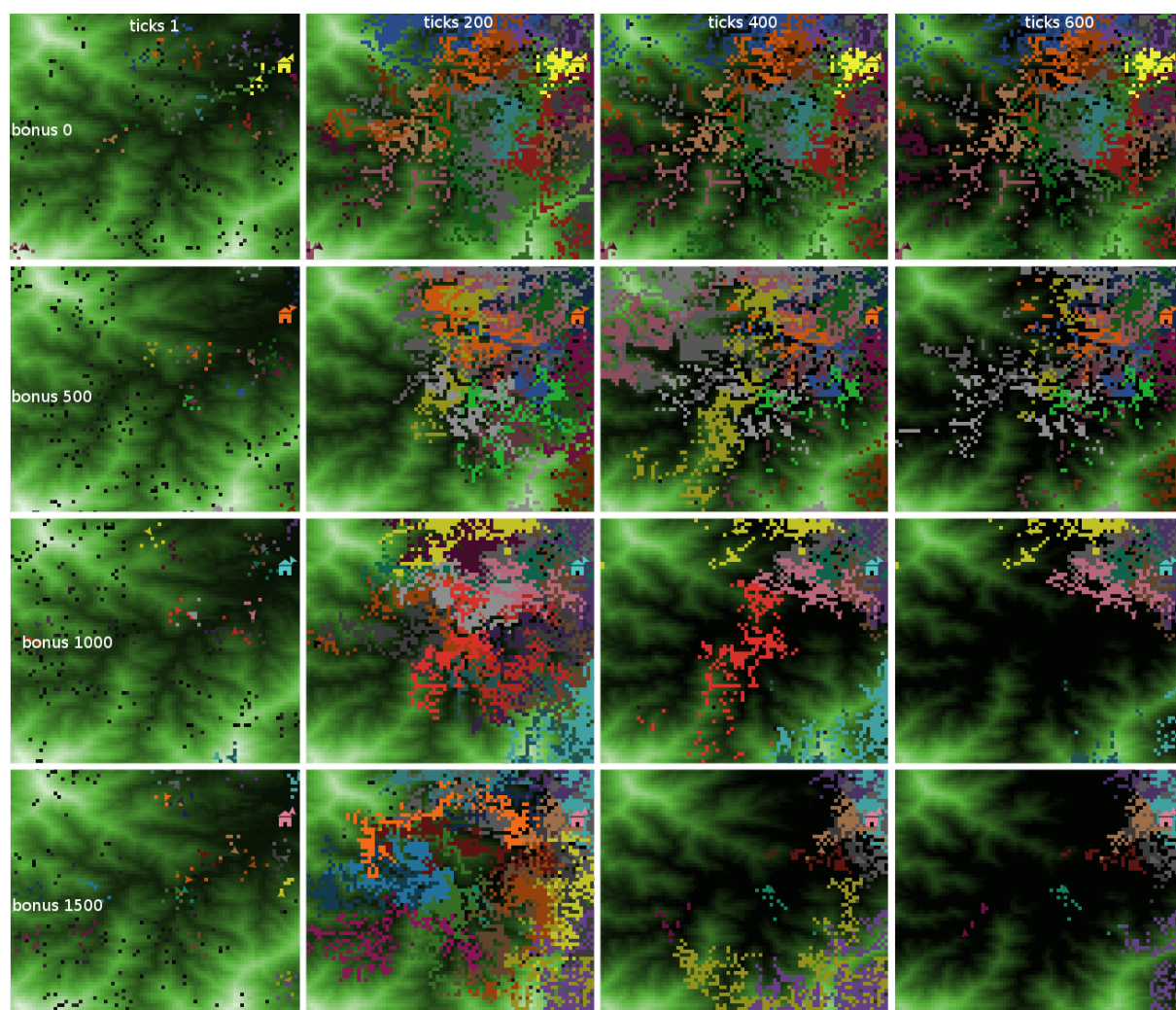


Illustration 7: Distribution spatiale des parcelles en fonction du temps (horizontalement) et du bonus attribué (verticalement)

Illustration 7: Spatial plots distribution according to time course (horizontally) and bonus awarded (vertically)